中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）41(1)：79～89（1992）

溫室環境模式之研究
I. 數學模式分析[1]

陳加忠　賴建洲[2]　陳志昇[3]　黃照明[2]

摘要：在此研究中推衍一數值化模式模擬溫室環境以做爲改良溫室微氣候之控制策略。熱傳模式之項目包括內部空氣之熱傳量，通風量，地面與植物體之熱平衡。溫室內部之長波熱幅射被視爲熱流失的重要項目。自水份平衡原理所推導之公式用以預測內部之相對濕度值。時間相關的土壤熱流值加以簡化爲由一特定間隔前之日照量所決定之函數特定值。大氣溫度，相對濕度與日照量爲此模式之輸入變數，並利用數值分析法撰寫完成 BASIC 軟體以執行此模式模擬作業。

關鍵詞：溫室，數學模式

爲避免不良天候對作物生長之影響，溫室等設施已被農民利用以改良生長環境。溫室的內部微氣候受到溫室設施各結構參數與外在大氣環境之影響。爲了界定量化此影響性，以提供適用模式以爲環境控制之用，在此研究以熱傳與質傳原理建立溫室內部微氣候模式，提供於溫室興建合理化之參考。此模式之驗證與應用研究已加以執行[(3)]。

溫室模式之建立與驗證的主要目的如下：㈠瞭解與量化外在環境因子變動時溫室內微氣候所受之影響。㈡以適用之環境模式做爲環境自動控制參考決策之用。㈢利用環境模式評估各型溫室於其環境設備下對於溫室內部環境所能控制之極限。㈣配合作物生長模式，經營成本模式……等以規畫溫室生長作業。Avissor 與 Maher[(8)]提出了溫室模式之兩項適用標準：㈠模式的預測能力必須具有準確性，並且在物理與生物性活動下以實驗加以驗證。㈡模式必須爲通用性（general），而且適用於各種環境情況下的各種作業系統。爲符合上述兩項要求，研究者所定義之溫室模式參數必須包含物理與生理之特性，通常使用的參數包括氣候資料（溫度、濕度、風速、日照量……等）與溫室各元件（覆蓋材料、風扇性能……等）熱學與光學性質。

溫室內微氣候模式之研究已有數十種之多，以其結構內容可區分爲簡易型(Simple)與複雜型（Complex)。以其運算解析之計算方式可分爲解析法（Analytic）與數值法（Numerical)。以模式與時間之關係可區分爲靜態型（Static, time-independent）和動態型（Dynamic, time-dependent）。一般而言，動態型的模式通常涉及了多樣變數，因此多爲複雜性模式。

簡易之溫室模式往往著重其實用性，例如 Albright[(6)]對美國地區所用溫室之熱量平衡提出簡易之估算方法：所有對溫室作用之太陽能量有三分之一被反射回到大氣或轉化爲光合作用之能源。三分之一因蒸散作用成爲潛熱，餘下之三分之一轉爲溫室內空氣之顯熱，由此三分之一之熱量可加以計算溫度內部溫度變化和所需通風量。

---

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告第 1611 號。
2. 本所農業工程系副研究員、助理研究員、研究助理。
3. 本所農場管理室助理。

以溫室內熱量平衡原理以預測溫室變化之研究由 Walker[19]首先加以建立，其考慮因子有日照能，通風逸出之能量，週壁熱傳能量，地面傳導能量與植物生理作用消耗能量，所得預測值與量測值相差2°F之內，此結果爲以後研究者加以改良引用。

以此型溫室模式加以局部修正，配合時間間隔變化量（Time interval variables），Duncan 等人[10]推衍一溫室模式以分析冬日熱量之需求量，其預測值與實測值之差異值在1°C之內。

典型的複雜動態模式可以以 Takakura 等人[16]之模式爲代表，模式參數增加對植物葉溫，溫室內水份質傳遞，地面之熱貯藏能力，外界風速對覆蓋物傳導係數之影響與溫室內壁對太陽能傳遞能力之影響，因此其模式包含以下五大項之熱平衡：㈠覆蓋玻璃之內外表面與中間熱傳遞㈡內部空氣之能量質平衡。㈢內部空氣之質平衡。㈣植物葉表面能量平衡。㈤地面之能量平衡，後四項方程式皆涉及時間之微分方程式（$dTm/d\theta$），此模式共包含25個方程式。

Kindelan[14]認爲在溫室模式涉及溫度，濕度之各影響因子其熱貯存能力（Thermal storage capacity）可以忽視，但土壤之熱貯能力必須加以考慮，因此其模式考慮溫室覆蓋材料，內部空氣，植物與土壤，其中土壤項目則涉及了時間項數。

Froehlich 等人[12]以外界環境（溫度、濕度與日照量）週期性的變化爲邊界條件，模式包含內部空氣，覆蓋物、土壤、植物之溫度能量與溫室內水份能量平衡條件，其報導預測溫度之誤差值均在2°C之內。

Chandra 等人[9]以考慮溫室空氣溫度與水份之平衡模式受時間之影響，以進行溫室環控所需能源之分析，其模式之重點在以溫室內熱輻射交換性，以此界定一系列熱交換公式，其溫室植物溫度與地面溫度預測誤差約1.1°C。

Avissar 與 Mahver[8]，提出之模式概念類似 Kindelan[14]，僅有土壤項次考慮其受時間之影響。其模式驗證係利用三種不同覆蓋材料之溫室，報導之預測溫度誤差低於1.4°C。

模式之複雜性因其考慮因子而決定，在 Glaub 與 Treek[13]之溫室內熱與質傳遞分析研究中，即儘可能納入所能涉及之變數，其參數方程式共有59項。Akhter 等人[4]之溫室模式研究中，對溫室四周牆壁與屋頂分別建立公式，其環境模式共涉及100個以上之公式，其模式溫度預測之準確性係以模擬值與實測值進行迴歸，以其相關係數(R^2)皆在0.8以上。

Odink Ten Cate[17]針對荷蘭溫室環控之需求性，以溫室內空氣與土壤熱量平衡提出動態模式。其考慮項目爲通風系統、加熱系統，屋頂與牆壁，土壤等熱交換。其模式僅包含兩項公式，而將長波熱幅射，水份潛熱，作物等項目加以省略。作者並利用此方程式做爲環境控制之用。

爲比較不同模式對溫室內溫度預測的準確性，Van Bavel 等人[18]以三種模式分別驗證在世界三個地區（Labbock, USA. Tokyo, Japan, Wageninger, Netherlands），溫室之氣候數據，結果發現三個模式對空氣溫度，濕度與加熱能量需求之預測結果十分良好，但對於蒸發冷卻與蒸散作用量有顯著的差異值。

本省溫室內環境之預測模式雖然曾有報導[2]，其模式之建立係引用 Takarura 等人之模式，但其外在氣候條件係摒除利用感測器現場量測方式而以氣象實測值加以驗證此模式預測能力。此外 Takarura 等人建立之模式係以美國中北部明尼蘇達地區之溫室爲驗證[16]，其大陸型穩定氣候背景與本省海島氣候多變之自然環境相異，此模式對本省氣候之適用性未有所驗證。

由上述之文獻探討可知，針對本省溫室之環境模式有其建立之必要，而本省溫室之主要問題在於夏季熱累積與冬季寒流來襲之急速降溫，適用本省之環境模式應以此爲重點加以建立，因此本研究之目的在於探討影響溫室內部微氣候之各項因子，以建立適用本省溫室之環境模式。

環境模式建立

溫室模式之建立目的中，必須涵蘊對不同環境效應的說明能力，本省溫室主要環境效應有三種：

(一)溫室效應（Greenhous effect）

此效應主要來自熱累積，即表示在溫室中因陽光帶來的熱量遠超過散失的熱量，因此造成了內部溫度的增加。

(二)綠洲效應（Oasis effect）

此效應係在於高溫低濕的環境，由於水蒸發成蒸氣之作用，潛熱與顯熱的互換，使空氣之溫度降低，溼度增加。

(三)陽傘效應（Sunshade effect）

此效應係指在具有遮蔭且通風良好的溫室之內，因短波熱輻射被大量阻絕，地面以長波熱輻射向外散熱，因此造成溫室內溫度略低於外界。

此研究之環境模式之考慮主要在於以夏季高日射能爲外界供應之主要能量，因此在大量日射能量之條件下，溫室覆蓋物，內部空氣，生長之植物等熱能變化，與外界能量之變化爲立即反應（Rapid response），因此無時間延遲現象，唯一與時間相關之能量爲地面熱場。

在模式變數之氣候條件如日照量，大氣溫濕度、風向、風速等皆爲現地量測值，用以判別其對溫室內部環境之影響。

此模式之建立以熱、質平衡爲基礎，其假設條件如下：

1. 溫室內熱場（溫度與質場（水份）分佈均勻化）無梯度現象。
2. 熱輻射係數爲定值，不因波長等因素而改變。
3. 熱傳導與對流係數爲固定值，不因溫度改變。
4. 僅土壤之熱傳導爲時間相關，具其傳遞方向爲垂直（一維）。
5. 溫室空氣，覆蓋材料與植物等熱場爲穩定狀況（stady-state）。

(一)熱傳系統模式：

典型的溫室熱傳系統如圖一所示，所用符號說明如下，其應用單位爲w/m²。

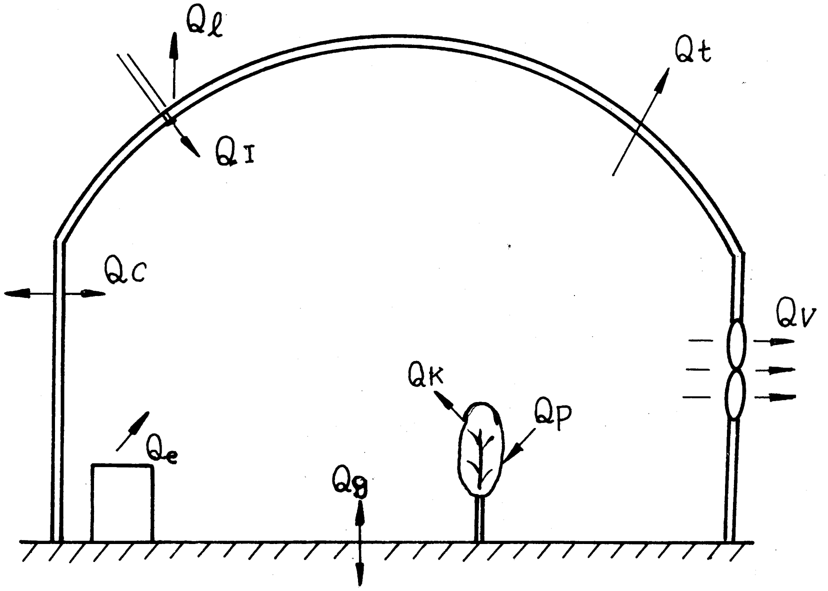

圖 1. 溫室熱傳系統

Fig 1. Thermal transfer system of greennouse

Q_I：太陽能入射溫室內有效能量。

Q_l：太陽能反射能。

Q_t：溫室內部對天空之長波輻射能。

Q_c：溫室內部與外界因傳導、對流作用之交換熱。

Q_v：因通風作用與外界空氣之熱交換量。

Q_e：溫室內機械設備（加熱器、冷氣機……等）所產生或吸收之熱量。

Q_g：內部空氣與地面之熱交換量。

Q_p：植物因光合作用所利用之能量。

Q_r：植物因呼吸作用所利用之能量。

各能量之計算公式如下：

1. Q_I值

$$Q_I = \tau_e\ I \cdot A_f \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\tau_e = \alpha \cdot \tau \quad \cdots\cdots(2)$$

τ_e：太陽光能量穿透覆蓋物之有效部分。

τ：太陽光能量穿透覆蓋物之直射部分，α為常數。

I：太陽能輻射量（w/m^2）。

A_f：地面面積（m^2）。

2. Q_t值

$$Q_t = \varepsilon_s \cdot \tau_t \cdot A_f \cdot \sigma \cdot [T_{1k}^4 - \varepsilon_a\ T_{ok}^4] \quad \cdots\cdots(3)$$

ε_s：平均穿透率（0.85）。

σ：波茲蔓常數。

ε_a：穿透係數（27°C, $\varepsilon_a = 0.9$）。

τ_t：長波熱傳係數（Thermal Transmittance）

對玻璃而言，τ_t為0.03，塑膠布溫室之τ_t值為0.8，由此可玻璃溫室之Q_t值極小，在實用上可以忽略，但在塑膠布溫室之熱傳系統中，Q_t值則十分重要。

T_{1k} 與 T_{ok} 為溫室內外溫度，單位為 °K。

3. Q_c值

$$Q_c = U \cdot A_w \cdot (T_1 - T_o) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$U = [U_k + H_v] \quad \cdots\cdots(5)$$

μ_k為熱傳導係數（w/m^2），H_v為溫室因縫隙等產生之對流熱傳遞，於通風作業時，H_v值可忽略。

A_w：溫室屋頂與四壁之面積（w^2）。

T_1 與 T_o 為內外溫度，單位為°C。

4. Q_v值

$$Q_v = \rho \cdot C_p \cdot M' \cdot [T_1 - T_e] \quad \cdots\cdots(6)$$

ρ為空氣密度（kg/m^3），C_p為比熱（1006 J/kg）

M'為通風量（m^3/sec）。

T_e為有效通風溫度。

不同通風狀況下，各參數如下：

(1)機械通風

M'值由各通風扇之作業能力和開啓數目所決定。

T_e值之計算如下：

a. 利用外界空氣抽取通風。

T_e：T_o，有效通風溫度與外界空氣溫度相同。

b. 利用蒸發冷卻法（水牆、噴霧……等）。

$$T_e=T_o-E_f\ (T_o-T_w) \qquad (7)$$

T_w為外界空氣濕球溫度，E_f為蒸發作業效率，對冷水牆（Pad and fan）而言，E_f約為80%。

c. 利用機械冷凍設備。

以冷凍設備送出之冷風溫度（T_c）為T_e值。

5. 自然通風：

自然通風之效應包括溫差效應和風力效應。

A. 溫差效應：

自然通風中其T_e值與外界空氣相等。其M_t'值計算方式係利用 Foster 與 Dowm[11]之研究結果，中立平面高度（height of the neutral plane）$\bar{h}$之計算如下：

$$\left|\bar{h}-\frac{d}{2}\right|^{\frac{3}{2}}-\left|\bar{h}+\frac{d}{2}\right|^{\frac{3}{2}}-\frac{3w}{4}\frac{|\bar{h}-H|^{\frac{3}{2}}}{\bar{h}-H}=0 \qquad (8)$$

d為側面開口之高度（m），H為側面開口與屋頂開口之距離，w為屋頂開口之寬度。

公式(8)之計算涉及絕對值與乘冪值，並非一簡單代數公式，因此需要以數值方法$\bar{h}$值。

a. 在 $\bar{h}>\frac{d}{2}$ 時，

$$M_t'=C_d\left(\frac{2g\cdot T_d}{T_{ok}}\right)^{0.5}\cdot\left[W\cdot l\cdot(H-\bar{h})^{\frac{1}{2}}\right] \qquad (9)$$

b. 在 $\bar{h}<\frac{d}{2}$ 時，

$$M_t'=C_d\left(\frac{2g\ T_d}{T_{ok}}\right)^{0.5}\left[Wl(H-\bar{h})^{\frac{1}{2}}+\frac{4l}{3}\left(\frac{d}{2}-\bar{h}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \qquad (10)$$

C_d為排出（Discharge）係數，g為重力加速度（9.8m/s^2），l為溫室長度，T_o為外在溫度（°C），T_d值為內外溫度差之絕對值：

B. 風力效應：

因外界風力引起之通風量（M_w'）其計算公式如下：

$$M_w'=C_w\cdot A_l\cdot V_w \qquad (11)$$

A_l：通風入口之開口面積（m^2）

V_w：風速（m/s）

C_w：有效利用係數，因受風角度而異。

C. 綜合效應：

通風效應包括溫差及風力兩項綜合效應時，其有效通風量為M_p'，

$$M_p'=\left(M_t'^2T+M_w'^2\right)^{0.5} \qquad (12)$$

6. Q_g值

在溫室內各環境參數項目最複雜之項目為土壤能量，由於土壤對太陽能量之吸收，在一段時期後使其溫度增加，而在日射能量減弱時，土壤之溫度熱累積釋放出熱量，因此地面土壤可視為能量貯存庫（Energy Resevior）。

土壤能量之計算公式十分複雜，其參數如熱傳導係數受到其成份，結構與含水率之因素所影響[6,16,17]。在動態模擬公式有以二維（X. Y向）或一維微分方程式求解，其邊際條件係假定某一深度之

土壤爲恆溫，其假設的土壤層次相關，荷蘭 Udink Ten Cate[17]僅假定土壤爲兩層且爲垂直方向，Takarura 等人[10]假定五層土壤，並考慮 X—Y 方向，因此其土壤熱場方程式有20組。

在日本之溫室應用手册[1]中，可利用之資料有2種：(一)溫室地面之單位面積熱傳量 GE與室外溫度差之關係，溫差10°C時，GE 值爲23w/m²，4°C時，GE 值約爲26w/m²，由 Papadakis 等人[15]之研究，在高日照地區，土壤熱傳遞之比例不大，其範圍介於－15～35w/m²，此與日人之研究結果近似。

國內之溫室利用極少有直接栽植於地表之上，而以盆架植床栽植之方式居多，其土壤所受之遮蔽比率大，日射能與土壤表面之熱交換較少。

在此研究中，爲簡化繁雜的微分方程式運算並兼及考慮日照量對土溫變化之遲滯（Time delay）影響，將Qg值計算定義如下：

$$Q_g = GE \cdot A_f \quad \cdots\cdots(12)$$

GE：土壤熱傳量（W/m²）

GE 值爲溫室地面所照射之日照量與延遲時間效應之函數。在此研究中，此延遲效應自實驗量測約爲1.5小時，因此GE值之函數圖如圖2。其應用說明如下：在判定GE 值時，以1.5小時前之日射量（I）爲基礎，其適用情況有四種：$\frac{d_I}{d_t}$表示 I 值隨時間之增減狀態，I_o爲特定值。

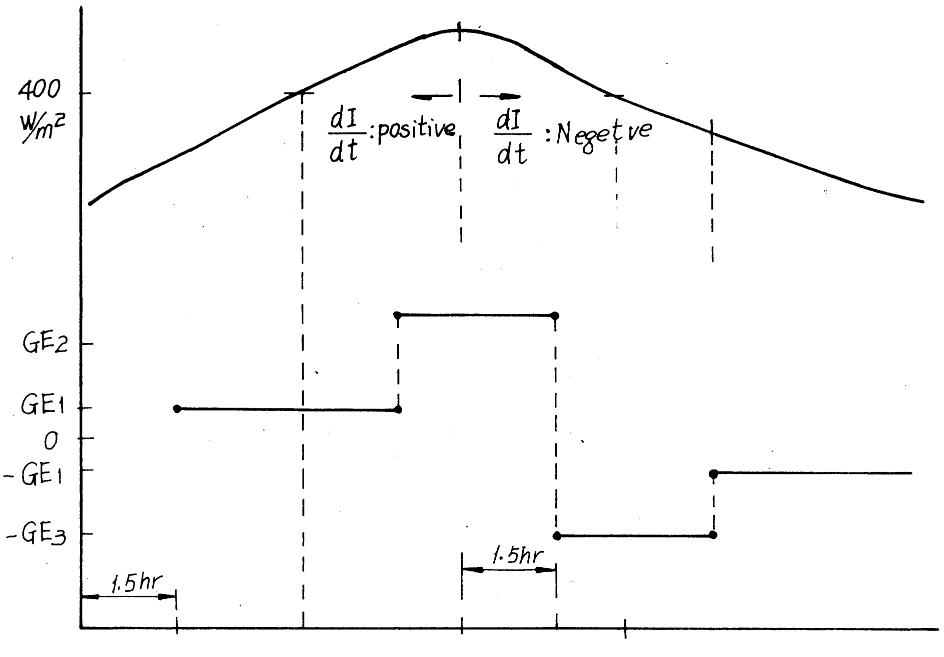

圖 2. GE 值與日射量，日照時間之關係

Fig 2. Relations of GE value with solar intensity and time.

1. $\frac{d_I}{d_t}$值爲正且小於I_o值，$GE = GE_1$

2. $\frac{d_I}{d_t}$值爲正且大於I_o值，$GE = GE_2$

3. $\frac{d_I}{d_t}$值爲負且大於I_o值，$GE = -GE_3$

4. $\frac{d_I}{d_t}$值爲正且小於I_o值，$GE=-GE_2$

5. Q_p 與 Q_r

由文獻可知[6,20]，作物之光合作用所耗能量可以不計，而Q_p值之計算有兩種。

(1) $Q_p=E_p \cdot P_f \cdot Q_I$[20] ……(14)

P_f：植物占溫室地面之比例。

E_p：植物作爲能量之比例，因植物而異，通常爲0.2～0.8，Walker 等人認爲0.5之數值可以適用[20]。

(2)利用蒸散潛能之概念[10]

以 PET（Potential Evapotranspiration）之概念計算溫室內作物對太陽能量之利用。

$$PET=0.373 \cdot Q_I \cdot (0.8+0.01 \cdot T_I) \quad \cdots\cdots(15)$$

$$Q_p=0.675 \cdot PEI \cdot P_f \cdot A_f \quad \cdots\cdots(16)$$

(3)利用蒸散水質量公式[9]

利用植物蒸散作用之水氣質量換算其蒸發熱量，用以爲溫室內植物能量公式。

在此研究中利用公式(12)，(13)之作用公式以計算Q_p值，因此

$$Q_p=0.252 \cdot P_f \cdot A_f \cdot Q_I \cdot (0.8+0.01T_I) \quad \cdots\cdots(17)$$

由上述各種熱能量可建立溫室熱系統模式：

（進入溫室之熱能）＝（移出溫室之熱能）

代人各Q值，其正負號由其熱能流入或流出方向所決定。

$$Q_I(\pm)Q_e=Q_t+Q_p(\pm)Q_c(\pm)Q_v(\pm)Q_g \quad \cdots\cdots(18)$$

(二)質傳系統模式

由於國內溫室之作業環境日照量充沛，CO_2濃度的補充問題並不重要，在質傳係統中僅考慮空氣中水份之平衡。其質平衡公式：

〔進入溫室內空氣中之水份〕＝〔離開之水份〕

$$\rho_I H_I=\rho_o H_o+W_e+W_p+W_g \quad \cdots\cdots(19)$$

ρ_I, O：溫室內外空氣之密度（kg/m^3）

H_I,O：溫室內外空氣之濕度比值（kg of H_2O/kg of dry air）。

W_e：機械設備（如水牆、噴霧）加入之單位水量（kg of H_2O/m^3）。

W_p：植物蒸散作用放出之單位水份（kg of H_2O/m^3）

W_g：地面放出之單位水份（kg of H_2O/m^3）。

在正常狀況下 W_p 與 W_g 值通常可忽略[6,20]，又 ρ_I 與 ρ_o 之差異十分小。質傳模式可改寫如下：

$$H_I=H_o+W_e/\rho_o \quad \cdots\cdots(20)$$

環境模式解析用程式

溫室內空氣溫度之求解公式自公式(六)推衍如下：

$$(\pm)Q_e+\alpha \cdot \tau \cdot I \cdot A_f=\varepsilon_s \cdot \tau_t \cdot A_f \cdot \delta〔T_{Ik}{}^4-\epsilon_a T_{ok}{}^4〕+(U_k+H_u) \cdot A_w \cdot (T_I-T_o)+\rho C_p M'〔T_I-T_e〕+GE \cdot A_f+0.252 \cdot P_f \cdot A_f \cdot \alpha \cdot \tau \cdot I \cdot Q_I \cdot (0.8+0.01T) \quad \cdots\cdots(18)$$

此公式涉及$T_I{}^4$值，因此無法以代數公式直接求得T_I值，必須以數值方法求解，此研究中所用方法爲 Bi-section 法，假定 T_I 值於5～75°C之間，以近似法求解。

在自然通風之情況，Q_v 項M'值之計算涉及了 D_T 值，而 D_T 值爲量測值 T_o 與 T_I（公式之求解值）之差異值，因此在求解時假設 $D_T(1)=6$°C，以重覆迭替方式（Iterative method）求逼近值。

爲執行模式公式之運算，本文作者以 GW-BASIC 撰寫軟體程式 TARI 1 ，以其交談式語言運作方式，以爲未來應用時結合電腦環控之用，此軟體之流程圖如圖3所示：

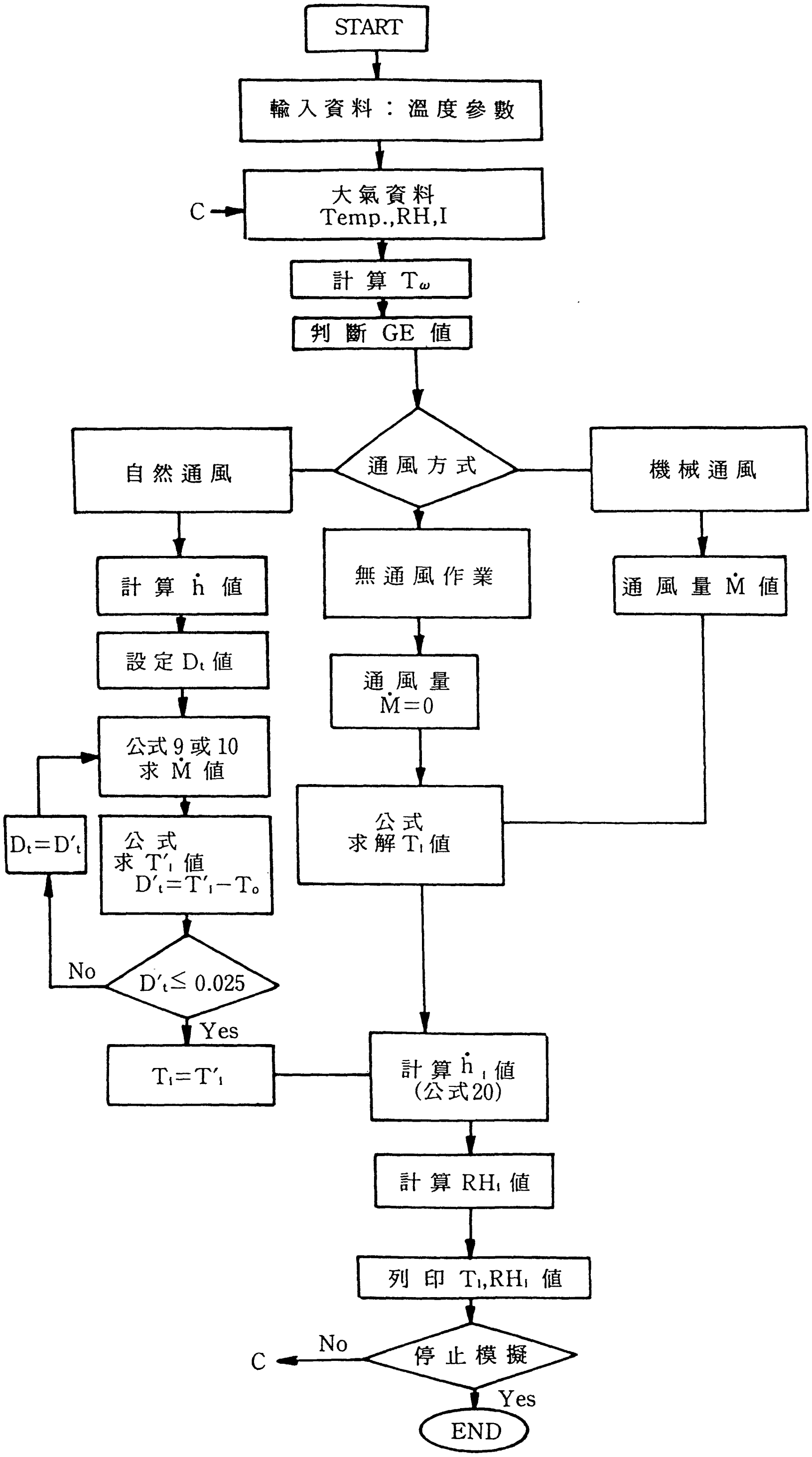

圖3. 溫室模式計算流程圖

Fig 3. Flow chart for the greenhouse model.

此程式包含五組副程式：

一、Tw Subroutine

用以自RH值，T_d值（乾球溫度）換算濕球溫度。

二、$\bar{h}$ Subrotine

用以執行自然通風時，公式(8)中$\bar{h}$值之計算。

三、T_l Subroutine

用以執行公式(18)中 T_l 之求解值。

四、D_l subroutine

結合 T_l Subroutine，用以計算自然通風時 T_l 值。

五、RH_l Subroutine

用以自公式(20)中H_l值與大氣之 Temp, RH 值計算溫室內濕度 RH_l 值。

環境模式 TARI 1 執行時，必須先輸入溫室之參數值與大氣資料（溫度、濕度與日照量）。應用於環境控制時，大氣資料可介由感測器之訊號傳輸作業。直接輸入軟體。軟體計算 T_w 值與依賴氣象資料判定 GE 值後，使用者再輸入通風作業之狀況，程式即執行運算，將溫室內 T_l 與 RH_l 直接印出。

模式之準確性與預測能力必須藉由實測數據之比較才能驗證，此研究所得之溫室氣候模式已有詳盡之驗證並執行其敏感度分析（陳等人[4]）。

結　論

爲推衍適用之溫室微氣候模式，此研究參考已知文獻之溫室環境影響參數，並配合本省之地區氣候條件，用以提出適用之模式。在預測內部溫度之熱量平衡方向，包含內部空氣與週壁之熱傳導，通風量影響與植物體之熱平衡，並考慮溫室內部長波熱輻射效應，土壤之熱流場以一特定之函數值代表。在質量平衡方面以水份之收支量預測溫室內相對濕度值，執行模式計算所需要之輸入值爲大氣溫度，濕度與日照量。其計算所用軟體係依據數值方法所完成。

參考文獻

1. 王鼎盛・1988・設施園藝設計手册.初版.臺北。

2. 王鼎盛，邱文山・1990・本省溫室內溫濕度之預測模式.中國園藝。36（2）：108—122.

3. 陳加忠，賴建州，陳志昇，黃照明・1992・溫室環境模式之研究（二）.模式驗證與應用，中華農業研究41(1)：90～114。

4. Akhter, P., G. E. Meyer and J. A. Deshazer. 1988. Dynamic simulation of greenhouse environment and thermal storage. ASAE Paper. No. 88—4526 St. Joseph, MI.

5. Albright, L. D., I. Seginer, L. S. Marsh and A. Oko. 1985. In situ thermal calibration of unventilated greenhouse. J. Agric. Engng. Res. 31：265—281.

6. Albright, L. D. 1991. Environment control for animals and plants. lst ed. ASAE.

7. Al-Kayssi, A. W., A. A. Al-Karaghouli, A. M. Hasson and S. A. Beker. 1990. Influence of soil moisture content on soil temperature and heat storage under greenhouse conditions, J. Agric. Engng Res. 45：241—252.

8. Avissar, R. and Y. Maher. 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. Trans. of ASAE. 25：1711—1720.

9. Chandra, P., L. D. Albright and N. R. Scott. 1981. A time dependent analysis of greenhouse thermal environment. Trans. of ASAE. 24：442—449.

10. Duncan, G. A., O. J. loewer and D. G. Colliver. 1981. Simulation of energy flows in a greenhouse : Magnitudes and conservation potential. Trans. of ASAE. 24 : 1014—1021.

11. Foster, M. P. and M. J. Domn. 1987. Ventilation of livestock buildings by natural convection. J. Agric. Engng Res. 37 : 1—13.

12. Froehlich, D. P., L. D. Albright, N. R. Scott and P. Chandra. 1979. Steady-periodic analysis of glass-house thermal environment. Trans. of ASAE. 22 : 387—399.

13. Glab. J. C. and G. J. Trezek. 1981. Heat and mass transfer analysis of greenhouses. ASAE Paper. No. 81—4031. St. Joseph, MI.

14. Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Trans. of ASAE. 23 : 1233—1239.

15. Papadakis, G., A. Frangoudakis and S. Kyritsis. 1989. Soil energy balance of a solar greenhouse. J. Agric. Engng. Res. 43 : 231—243.

16. Takakura, T., K. A. Jordan and L. L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. Trans. of ASAE.

17. Udink Ten Cate, A. J. 1987 Analysis and synthesis of greenhouse climate controllers. In Computer application in agricultural environments, ed. J. A. Clark, K. Grerson and R. A. Saffell. lst. ed. P. 1—19. London : Butterworths.

18. Van Bavel, G. H. M., T. Takakura and G. P. A. Bot. 1985. Global comparison of three graanhouse climate models. ACTA 174 : 21—33.

19. Walker, J. N. 1865. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. Trans. of ASAE. 8 (3) : 445—448.

20. Walker, J. N., R. A. aldrich and T. H. Short. 1983. Quantity of air flow for greenhouse structures. In Ventilation of agricultural structures, ed. M. A. Hellickson and J. N. Walker, P. 257—277. ASAE.

The Studies of the Greenhouse Environmental Model Part I. Mathematical Model Analysis[1]

C. C. Chen, C. C. Lai[2], C. S. Chen[3] and C. M. Huang[2]

Summary

In order to provide the control strategy for improving the growth microclimate, a numerical model was developed to simulate the greenhouse environment. A heat transfer model consists of the thermal balance of inside air, floor, plants and ventilation effect. The radiation energy of long wave emits from the inner of greenhouse was considered as an important factor of heat loss. The time-depentent soil heat flux was simplified as a specific function that quantified by the magnitude of solar intensity at previous interval period. The equation derives from the moisture balance principle was to predict the value of relative humidity. Temperature, relative humidity of air and solar intensity were the input variables for the model. A BASIC sofeware program using numerical analysis technique was proposed to execute the simulating work.

Key words : Greenhouse, Mathematical Model.

1. Contribution No. 1611 from Taiwan Agricultural Research Institute.
2. Associate researcher, assisant researcher and research assistant, Depart. of Agricultural Engineering.
3. Assistant, Office of Farm Management, TARI, Taichung, Taiwan.